

転炉 Fe_tO ダイナミック制御による高効率転炉溶銑脱りん技術

High Efficiency Hot Metal Dephosphorization through Fe_tO Dynamic Control in BOF

菊池 直樹 KIKUCHI Naoki JFE スチール スチール研究所 製鋼研究部長・博士（環境）
松井 章敏 MATUSI Akitoshi JFE スチール スチール研究所 製鋼研究部 主任研究員（課長）
富山 伸司 TOMIYAMA Shinji JFE スチール スチール研究所 計測制御研究部 主任研究員（課長）

要旨

製鋼工程におけるスラグ発生量低減、鋼材の品質向上を目的に溶銑脱りん処理が行われる。本開発では、小型溶解炉実験、実機転炉型溶銑脱りん処理において、上吹き酸素により生成する Fe_tO 生成挙動と、脱りん反応に及ぼすスラグ中 Fe_tO 濃度の影響を調査し、反応モデルに基づく解析を行った。その結果、スラグ中 Fe_tO 濃度が脱りん反応効率に大きく影響を及ぼすことが明らかとなり、得られた結果に基づき、安定的な低りん銑化を目的に、吹錬中の酸素バランスに基づくスラグ中 Fe_tO 濃度の推定、独立成分分析による上吹き酸素のパターン決定を行う制御系を確立した。その結果、安定した低りん銑化が可能となり、低 P 鋼種（[mass% P] ≤ 0.015）の安定製造に貢献した。

Abstract:

Hot metal dephosphorization is frequently performed in steelmaking process to reduce slag generation and improve the quality of steel products. In this report, iron oxide generation and dephosphorization behavior in laboratory-scale experiments and an actual converter were investigated and analyzed by mathematical models. The results revealed that dephosphorization is significantly influenced by iron oxide in slag. Based on these results, a new control system was introduced, which comprises 1) estimation and dynamic control of iron oxide in slag by calculating the oxygen balance at 1 second interval during blowing and 2) guidance on top blowing patterns by applying independent component analysis. As a result, phosphorus content after blowing decreased and also became stable, which contributed to production of low-phosphorus steel grades ([mass%P] ≤ 0.015).

1. はじめに

鋼材品質要求の厳格化対応、製鋼スラグ発生量削減を目的として、溶銑予備脱りん処理プロセスが広く導入されている。これまで溶銑脱りん処理においては低りん銑の溶製や反応効率向上のため、蛍石が使用されてきたが、フッ素の土壌への溶出基準値改正により、フッ素含有スラグの再利用が困難となり、溶銑脱りんにおけるフッ素（蛍石）を用いない精錬方法の開発が急務である。蛍石の脱りん反応への効果については、① CaO の溶融促進、②酸素ポテンシャル増大、③スラグの Ca²⁺ の活量増大、等が報告されている^{1,2)}。このうち① CaO の溶融促進、②酸素ポテンシャル増大、の効果を補うためには脱りん精錬スラグ中の Fe_tO 濃度を高めることが有効であり、Fe_tO 含有スラグと溶銑中りんの反応に関する種々の研究³⁾が行われてきた。

一方、近年では転炉型設備を用いた溶銑脱りん処理の開発が進められてきた。転炉型脱りん炉の大きな特徴として、

高速送酸を利用した短時間処理が挙げられるが、高速送酸条件下でのスラグ中 Fe_tO の生成挙動に関する研究例は少なく、十分な考察が進んでいない。

そこで本報では、溶銑に酸素を上吹きした場合の Fe_tO 生成モデルと、それに対応した脱りん反応モデルによる低りん銑化の取組を示す。さらに転炉溶銑脱りん処理中の Fe_tO 生成に関する独立成分分析による吹錬パターンの決定、酸素バランスに基づく Fe_tO 生成速度のダイナミック制御システムにより、実機転炉型溶銑脱りんの操業条件の最適化を図ったので報告する。

2. スラグ中 Fe_tO 生成促進による低りん銑化⁴⁾

2.1 Fe_tO 生成モデル

既報⁴⁾にて 3 kg、200 kg 規模の溶銑脱りん実験を行い、溶銑に酸素を上吹きした際の Fe_tO 生成挙動を調査した。得られた結果における各因子の影響を定量化した。スラグ中 Fe_tO は上吹き送酸により生成され、生成された Fe_tO が溶銑中 [C] との反応により還元される。Fe_tO の還元がスラグ中

Fe₂O₃ の物質移動律速であるとする、Fe₂O₃ 生成の速度式は、Fe₂O₃ の還元と生成のバランスより (1) 式で表される。

$$\frac{d(\text{Fe}_2\text{O}_3)}{dt} = \frac{-k_s A}{V_s} \{ (\text{Fe}_2\text{O}_3) - (\text{Fe}_2\text{O}_3)_e \} + \alpha \cdot F_{\text{O}_2} \quad (1)$$

ここで、 A : 反応界面積 (浴表面断面積) [m²], F_{O_2} : 上吹き酸素流量 [m³-norm.・s⁻¹/t-flux], k_s : スラグ中物質移動係数 [m/s], V_s : フラックス体積 [m³], $(\text{Fe}_2\text{O}_3)_e$: 平衡 Fe₂O₃ 濃度 (高 [C] 濃度では 0) [mass%] である。なお、(1) 式中 α は上吹き送酸による鉄の酸化効率を表す定数であり、後述するように実験結果とのフィッティングにより算出した。(1) 式を積分して (2) 式を得る。

$$(\text{Fe}_2\text{O}_3) = \frac{1}{(k_s A / V_s)} \left[\left\{ \frac{k_s A}{V_s} (\text{Fe}_2\text{O}_3)_i - \alpha \cdot F_{\text{O}_2} \right\} \exp\left(-\frac{k_s A}{V_s} t\right) + \alpha \cdot F_{\text{O}_2} \right] \quad (2)$$

ここで、 t : 時間 [s], $(\text{Fe}_2\text{O}_3)_i$: 初期 Fe₂O₃ 濃度 [mass%] である。本研究者は、スラグ側物質移動係数 k_s も攪拌動力 ε に依存すると仮定し、スラグ側物質移動係数を攪拌動力の関数; $k_s \propto \varepsilon^r$ とおいた。攪拌動力は上吹き送酸による攪拌動力 ε_{top} [W/m³] と吹き込みガスによる攪拌動力 ε_{bot} [W/m³] の和とした。更に、温度依存性についてはアレニウス型で置き、活性化エネルギーには CaO-SiO₂-Al₂O₃-FeO 系スラグ中の Fe の拡散に対する値 155 kJ/mol⁵⁾ を用いることとした。これらの仮定に基づいて、(2) 式中 k_s を (3) 式のように、温度依存性と溶銹内の攪拌動力を考慮した式として評価した。

$$k_s = B \cdot \exp\left(-\frac{155\,000}{RT}\right) \cdot (\varepsilon_{\text{top}} + \varepsilon_{\text{bot}})^r \quad (3)$$

ここで、 R : 気体定数 (=8.314 J/(mol・K)), r : 定数, T : 温度 [K] である。(3) 式中の B はフィッティングパラメータとして、実験結果と一致するように定めた。

上吹き送酸による攪拌動力 ε_{top} [W/m³] は甲斐ら⁶⁾ による次の報告式を用いて評価した。

$$\varepsilon_{\text{top}} = \frac{0.137 \cos \theta}{V_m} \cdot \frac{Q_{\text{O}_2}^3 N}{\lambda^2 D^3 h} \quad (4)$$

ここで、 D : 上吹きノズル径 [m], h : ランス高さ [m], N : ガス分子量, Q_{O_2} : 上吹き送酸流量 [m³-norm./s], V_m : 溶銹体積 [m³], θ : 上吹きノズル傾角 [°], λ : 上吹きノズル孔数である。

また、吹き込みガスによる攪拌動力 ε_{bot} [W/m³] は Sundberg⁷⁾ の報告式を用いて評価した。

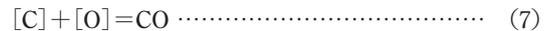
$$\varepsilon_{\text{bot}} = \frac{372QT}{V_m} \cdot \left\{ 1 - \frac{273}{T} + \ln\left(1 + \frac{Z}{1.48}\right) \right\} \quad (5)$$

ここで、 Q : 吹き込みガス流量 [m³-norm./s], Z : 吹き込み深さ [m] である。なお、溶銹及びスラグの密度はそれぞれ 7 000 [kg/m³], 3 000 [kg/m³] で一定とした。上記のモデルによる計算において定数 B , r , α を小型溶解炉実験値と一致するように定めた結果、 $B=1.7$, $r=0.25$, $\alpha=0.6$ となった。

2.2 脱りん反応モデル

上述の Fe₂O₃ 生成モデルから脱りんモデルの構築を検討した。従来報告されている脱りんモデルの代表的なものとして、Ohguchi ら⁸⁾ により提唱されている競合反応モデルが挙げられる。競合反応モデルは、各成分の溶銹/スラグ間の反応を溶銹及びスラグ側物質移動の混合律速とし、各物質の定常状態を仮定して酸素のマスバランスにより反応界面の酸素活量を決定し、各成分の経時変化を算出するモデルである。脱りん反応において、反応界面における酸素活量を決定するうえで、スラグ中 Fe₂O₃ 濃度の定量化が非常に重要と考えられる。そこで、本報告では、スラグ中 Fe₂O₃ 濃度を上述の Fe₂O₃ 生成モデルにより直接的に求め、競合反応モデルと組み合わせることで脱りんモデルの構築を検討した。競合反応モデルの適用にあたり、以下の仮定を置いた。

- 反応は溶銹、スラグ両相の物質移動を律速段階
 - スラグ/溶銹反応界面での化学反応は十分速い
 - CO ガス発生速度は界面での CO 過飽和度に比例
 - 反応界面の酸素ポテンシャルはすべて共通
- 本報告においては、(6) 式及び (7) 式の反応を考慮する。



ここで、(6) 式中の X は Si, Mn, P, Fe であり、 n は反応次数である。これらの界面での平衡関係を仮定すると、次の式が成り立つ。

$$E_x = \frac{(\%XO_n)^*}{[\%X]^* a_o^{*n}} = \frac{100 C_{N_{xO_n}} f_x K_x}{\rho_s \gamma_{xO_n}} \quad (8)$$

$$E_c = \frac{P_{co}^*}{[\%C]^* a_o^*} = f_c K_c \quad (9)$$

ここで、 a_o : 酸素活量, C : スラグの単位体積当りのモル量 [mol/cm³], E_x : 各成分の有効平衡定数, f_x : 各成分のヘンリー基準の活量係数, K_x : 各成分の酸化反応の平衡定数, N_{xO_n} : 各酸化物の分子量, P_{co} : CO 分圧 [atm], ρ_s : スラグ密度 [g/cm³], γ_{xO_n} : 各酸化物のラウール基準の活量係数であり、添え字の*はスラグ/溶銹界面を表す。界面酸素活量

a_o^* は (10) 式で定義される。

$$a_o^* = f_o [\%O]^* \dots\dots\dots (10)$$

一方, (7) 式及び (8) 式の各反応における反応速度 J_x [$\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}/\text{cm}^2$] は (11)~(13) 式で表される。

$$J_x = F_x \{ [\%X] - [\%X]^* \} \\ = F_{x_{o_n}} \{ (\%X_{o_n})^* - (\%X_{o_n}) \} \dots\dots\dots (11)$$

$$J_c = F_c \{ [\%C] - [\%C]^* \} = G_{co} (P_{co}^* / P_{co} - 1) \dots (12)$$

$$J_o = F_o \{ [\%O] - [\%O]^* \} \dots\dots\dots (13)$$

ここで, F_x , $F_{x_{o_n}}$ は各成分, 酸化物の修正物質移動係数であり (14), (15) 式で表される。

$$F_x = \frac{k_m' \rho_m}{100 N_x} \dots\dots\dots (14)$$

$$F_{x_{o_n}} = \frac{k_s' \rho_s}{100 N_{x_{o_n}}} \dots\dots\dots (15)$$

ここで, k_m' , k_s' : 溶銑及びスラグ側物質移動係数 [cm/s], G_{co} : 現象論的反應速度定数 (CO 過飽和度) [$\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}/\text{cm}^2$], N_x : 成分 X の分子量, ρ_m : 溶銑密度 [g/cm^3] である。

各成分の反応が定常的に進行する時, 次の酸素バランス式が成立する。

$$2J_{Si} + J_{Mn} + 2.5J_P + J_{Fe} + J_c - J_o - 2G_{O_2} = 0 \dots\dots\dots (16)$$

ここで, G_{O_2} は単位面積当りの酸素供給速度 [$\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}/\text{cm}^2$] であり, 単位換算及び酸素効率を考慮して, 本研究では (17) 式を用いて求めた。

$$G_{O_2} = \frac{\alpha}{(2N_{FeO}/22.4/10)} \cdot \frac{F_{O_2} W_{flux}}{0.0224} \cdot \frac{1}{A \times 10^4} \dots (17)$$

ここで, A : 反応界面積 (浴表面断面積) [m^2], F_{O_2} : 上吹き酸素流量 [$\text{m}^3\text{-norm} \cdot \text{s}^{-1}/\text{t-flux}$], N_{FeO} : FeO 分子量, W_{flux} : フラックス重量 [t], α : (2) 式における定数 (=0.6) である。(8)~(15), (17) 式を (16) 式に代入して, 反応界面酸素活量 a_o^* が決定され, 各成分の濃度変化が計算できる。計算に用いた各物性値等は既報⁴⁾を参照されたい。

k_s' は (3) 式により求まる k_s を cm/s に単位換算したものをを用いた。 k_m' は北村⁹⁾により報告されている (18) 式の関係を用いた。

$$\log k_m' = 1.98 + 0.5 \log (\epsilon' \cdot Z^2 / d_c) \\ - (125\,000/RT) / 2.3 \dots\dots\dots (18)$$

ここで, ϵ' は攪拌動力であり, (4), (5) 式より得られる攪拌動力の和を W/t に単位換算したものである。また, Z : 浴深 [m], d_c : 浴直径 [m], R : 気体定数 ($=8.31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}/\text{mol}$), T : 温度 [K] である。溶銑及びスラグ密度はそれぞれ $7\,000 \text{ kg}/\text{m}^3$, $3\,000 \text{ kg}/\text{m}^3$ とし, 温度は $1\,350^\circ\text{C}$ とした。スラグの単位体積当りのモル量 C は Ohguchi ら⁸⁾の報告同様 $0.035 \text{ mol}/\text{cm}^3$ とした。ヘンリー基準の活量係数 f_x 及び平衡定数 K_x は熱力学データ¹⁰⁾を用いて算出した。なお, f_o に関しては J_o への影響が小さいことから $f_o=1$ とし, [P] の平衡定数については Turkdogan¹¹⁾の報告している (19) 式を用いた。



$$\log K_P = \frac{21\,740}{T} - 16.5 \dots\dots\dots (19)$$

ラウール基準の活量係数 $\gamma_{x_{o_n}}$ は萬谷¹²⁾により提唱されている正則溶体モデルを用いて, $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-MnO-P}_2\text{O}_5$ 系にて算出した。 P_{co} は 1 atm とし, G_{co} をパラメータとして各実験結果の [C] 濃度推移にフィッティングした結果, G_{co} は $8.0 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{s}^{-1}/\text{cm}^2$ となった。計算時間は 3 秒毎とし, その他の計算条件は実験水準に従った。計算過程において, 溶銑成分変化に伴うフラックス量増分はマスバランスによって計算し, バルクの Fe_2O_3 濃度は (2) 式より得られる値を用いた。計算される界面酸素活量 a_o^* の経時変化は, 熱力学データ¹⁰⁾から計算される Fe-O 平衡で決まる酸素活量は $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 程度に近く, C-O 平衡で決まる酸素活量に対して高いことから, 界面酸素活量はスラグ中 Fe_2O_3 濃度に強く影響されると考えられ, 脱りん効率向上に対してスラグ Fe_2O_3 濃度を制御することは非常に重要であると考えられる。

2.3 実機転炉型溶銑脱りん処理における評価

JFE スチール西日本製鉄所福山地区の 350 t 規模の実転炉にて脱りん処理実験を行った。前節までで得られた知見より, スラグ中 Fe_2O_3 濃度を高めるべく, 次のような吹錬条件の変更を行った。

- ① 上吹き酸素流量を 20% 向上
- ② 上吹き酸素による攪拌動力を 65% 低減
- ③ 吹錬前半の底吹き攪拌動力を 25% 低減
- ④ 吹錬後半の底吹き攪拌動力は従来と同等

この中で, 上吹き攪拌動力及び底吹き攪拌動力については (4) 式と (5) 式より評価した。上吹きの攪拌動力低減は上吹きランスのスロート径拡大により行い, 吹錬前半の底吹き攪拌動力低減は底吹きガス流量を減らすことで実現した。本研究により得られた Fe_2O_3 生成モデルと脱りんモデルを用いて実転炉での挙動解析を行った。解析にあたり, スラグ側物質移動係数の攪拌力依存性に関わる (3) 式中の係数 r については, 本小型実験にて求められた 0.25 を用いた。

Fe₂O₃ 生成モデルにより予測される吹錬終了後の (mass% Fe₂O₃) と、吹錬終了後に採取したスラグサンプルの (mass% Fe₂O₃) 分析値を **図 1** に示す。実験で得られたスラグ中 Fe₂O₃ 濃度は (mass%FeO) と (mass%Fe₂O₃) の合計値として (mass% Fe₂O₃) とした。モデルにより予測される Fe₂O₃ 濃度は実際の分析値と良好一致を示した。また、吹錬条件を改善したことにより (mass%Fe₂O₃) が上昇していることが分かる。**図 2** に脱りん挙動を示す。吹錬条件を変更することにより、脱りん速度が向上し、処理後 [P] 濃度が低減した。また図中には先述した脱りんモデルによる計算線を併記したが、モデルは脱りん挙動を良く表せている。**図 3** に蛍石を用いない条件での脱りん処理前の溶銑温度と脱りん処理後のりん濃度の関係を示す。

改善前においては、処理前溶銑温度が 1300℃を下回るような場合に処理後りん濃度が悪化する傾向が見られていた。

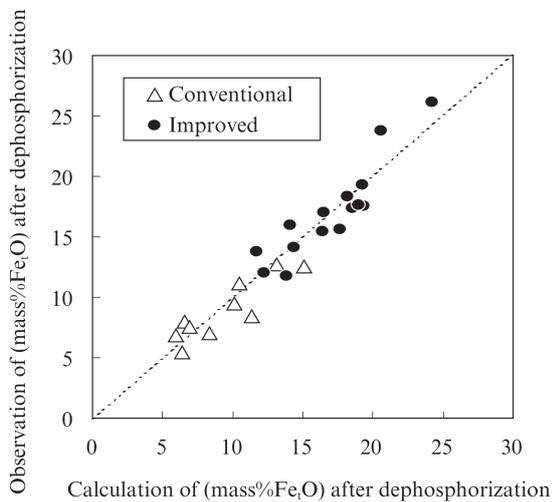


図 1 処理後スラグ中 FeO 濃度比較

Fig. 1 Comparison of iron oxide concentration in slag after dephosphorization

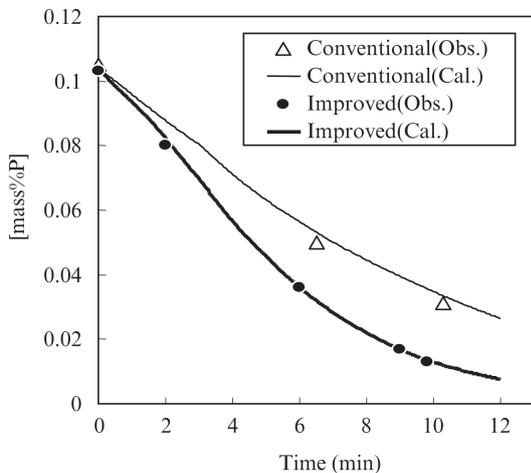


図 2 実機転炉における溶銑中りん濃度変化

Fig. 2 Changes in phosphorus content in hot metal in industrial plant

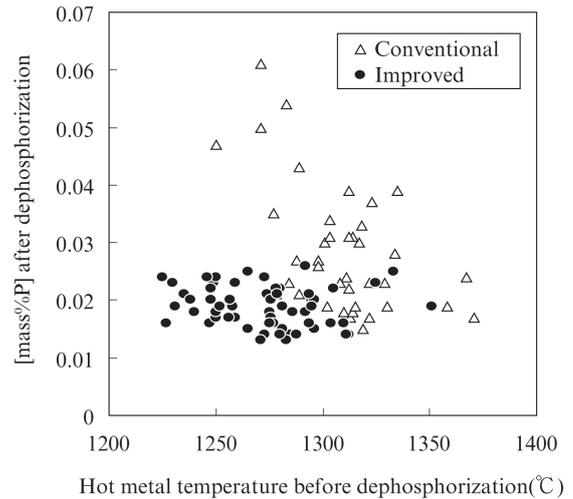


図 3 処理前溶銑温度と処理後溶銑中りん濃度の関係

Fig. 3 Relationship between hot metal temperature before dephosphorization and phosphorus content in hot metal after dephosphorization

これは低温のため CaO の滓化不足に陥ったものと考えられる。吹錬条件改善後は、スラグ中 Fe₂O₃ 濃度を十分に高めることができるため、溶銑温度が低くとも CaO の滓化を促進することができ、その結果、低温溶銑に対しても処理後りん濃度を安定させることが可能となったと考えられる。

3. 吹錬中の Fe₂O₃ 濃度推定と制御

3.1 酸素バランスによるスラグ中 Fe₂O₃ 濃度推定

2章の結果より、溶銑脱りん処理中のスラグ中 Fe₂O₃ 濃度の制御が重要であることが分かった。そこで、転炉溶銑脱りん処理中の Fe₂O₃ 濃度を推定、制御するシステムを構築した^{13,14)}。**図 4** に模式図を示す。吹錬中の酸素バランスを 1秒ピッチで計算し、不明分を Fe₂O₃ 生成に使用された酸素としてガイダンス表示した。インプット酸素は上吹き酸素ガス、添加された Fe₂O₃ であり、アウトプット酸素は脱 C (1次, 2次燃焼), Si, Mn, P 反応に消費された酸素である。不明分はインプットからアウトプットを減じた酸素量とした。スラグ量は添加した副原料と上記反応によって生成した酸化物の合計とした。計算に当たり、Si, Mn, P の酸化速度は事前に行った吹錬初期の炉内サンプリング結果から、酸素ガス量に対して 1次で反応が進行すると仮定し、サンプリング結果と合うように速度定数を一定値として決めた。炉内での脱 C 反応に使用された酸素量 (1次, 2次燃焼) は以下のようにして求めた。まず排ガス分析によって得られる vol%CO, vol%CO₂ の値を用い、vol%N₂ を 100-vol%CO-vol%CO₂ と仮定して算出し、排ガス流量を乗じることで N₂ 流量とする。得られた N₂ 流量から底吹き N₂ ガス流量を減じたものを、炉口燃焼に消費された空気中の N₂ 流量とし、

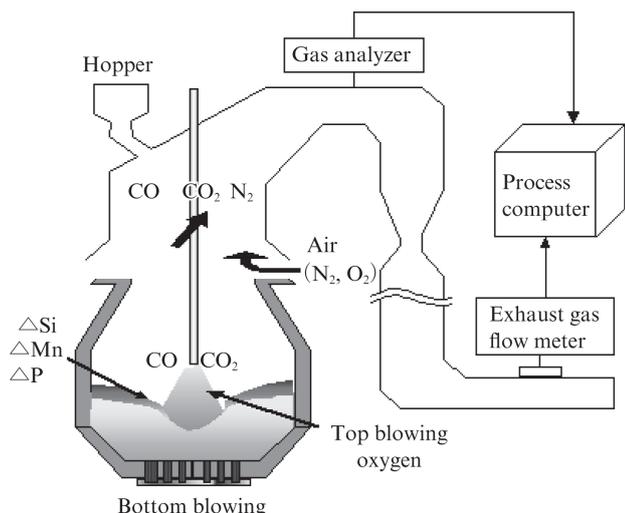


図4 上底吹き転炉吹錬中の酸素バランス計算に基づくスラグ中 FeO 濃度計算の模式図¹⁴⁾

Fig. 4 Schematic diagram of Fe₂O₃ calculation by oxygen balance in a top and bottom-blowing converter

空気中の O₂/N₂=1/4 として炉口での燃焼用酸素流量を決定する。排ガス分析値から得られる CO, CO₂ 流量から、算出される酸素流量から炉口燃焼の酸素流量を差し引くことで、炉内での脱 C (1,2 次燃焼) に使用された酸素量を算出した。また転炉の炉口から排ガス分析計までの配管径、長さより、ガス発生から分析計までの時間差として 16 秒の遅れ時間を計算に反映した。

吹錬中、終了時点の (mass%Fe₂O₃) 精度を検証した。(mass%Fe₂O₃) は、採取した実績のスラグ分析値の平均である FeO: Fe₂O₃=72.3:27.7 とした。実績 Fe₂O₃ 濃度は 10~50 mass% の範囲で相関関係を示し計算精度は -8~+2% の範囲であった。実績 Fe₂O₃ 濃度はマイナス側に偏倚しており、これは前工程スラグが炉内に持ち込まれた影響と思われる。

3.2 独立成分分析による吹錬条件決定

溶銑脱りん吹錬において、Fe₂O₃ 濃度を制御するに当たり、前節にて示した Fe₂O₃ 濃度推定トレンドを参照し、主に上吹き酸素条件 (酸素ガス流量、ランス高さ) を制御する。溶銑温度、成分の変動に伴い、大きく Fe₂O₃ 生成が変動する場合がある。そこで、溶銑成分等の処理条件に応じた上吹き酸素条件を独立成分分析により決定し、安定的に低りん化する制御系を適用した¹⁵⁾。新制御系適用は以下の 2 段階で行うことにした。

- STEP1: 過去処理の実績データに基づいて、次回処理の目標スラグ中 Fe₂O₃ 濃度パターンを生成
- STEP2: 過去処理のスラグ中 Fe₂O₃ 濃度、操作量パターンと次回処理の目標スラグ中 Fe₂O₃ パターンに基づいて、次回処理の操作量パターンを決定

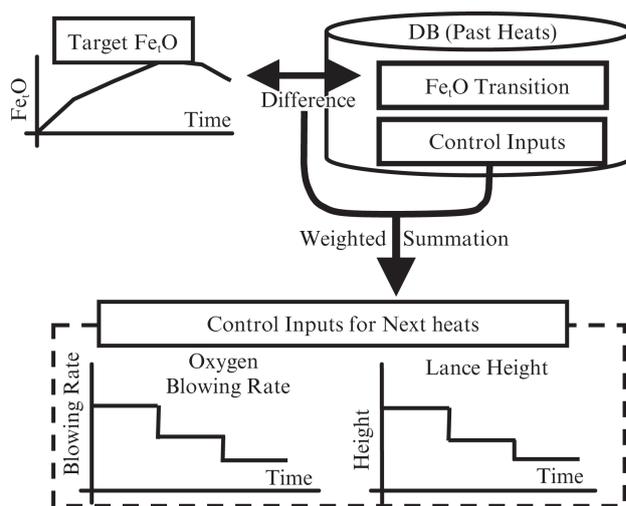


図5 操作量パターン決定アルゴリズム
Fig. 5 Structure of proposed control

どちらのステップにおいても過去実績データを統計的に利用した処理が行われるが、これは計測誤差や未知変動要因による制御精度悪化を抑制することを狙ったものである。

STEP1 における特徴成分抽出には独立成分分析 (Independent Component Analysis, ICA) の手法¹⁶⁾を用いる¹⁴⁾。過去データの溶銑条件、Fe₂O₃ パターン、処理後 [P] のデータベースを活用し、溶銑状態や操業条件が近く処理後溶銑中りん濃度が低い過去処理のスラグ中 Fe₂O₃ 濃度パターンを明確にする。

STEP2 では次回処理の Fe₂O₃ 濃度推移が目標パターンに近づくように、送酸速度及びランス高さパターンを決定する。これは、脱りん処理がうまくいった過去処理に習って操作量を設定することにより、処理後溶銑中りん濃度が低位安定するパターンを決定する。図5に操作量パターン決定アルゴリズムの概略図を示す。以上のSTEPに基づき、溶銑条件等に応じて適正な上吹き送酸条件をガイダンスとして表示する。

3.3 実機転炉溶銑脱りんへの適用結果

3.2 に示す上吹き酸素パターンの決定を行い、更に当該チャージのスラグ中 Fe₂O₃ 濃度推移を参照しながら吹錬中に送酸速度やランス高さを変化することにより、処理後のりん濃度が低位安定化した。更に低 P 鋼種 ([mass%P] ≤ 0.015) における成功率が 87.3 から 93.7% に向上した。

4. おわりに

本稿では、転炉溶銑脱りん処理におけるスラグ中 Fe₂O₃ 濃度の影響を反応モデル解析によって示すと共に、吹錬中のスラグ中 Fe₂O₃ 濃度制御による低りん銑化技術を紹介し、実機適用によるその有効性を示した。実機転炉溶銑吹錬中の

脱りん反応に及ぼすスラグ中 Fe₂O₃ 濃度の影響を調査し、Fe₂O₃ 生成と脱りん反応モデルに基づく反応速度論的解析によって、その影響を定量化した。

更に、処理中のスラグ中 Fe₂O₃ 濃度推定ロジックと独立成分分析による上吹き酸素パターンを決定する制御システムを適用した。その結果、工業的に転炉溶銑脱りん処理における低りん銑化を実現し、溶鋼の清浄化による高品質な製品を提供可能となった。また本技術の適用により発生スラグ量低減を実現し、高品質な製品の提供、納期短縮などのお客様満足度の向上や、地球環境保全への貢献を図っていく。

参考文献

- 1) Ito, K.; Sano, N. Tetsu-to-Hagané. 1983, vol. 69, p. 1747.
- 2) Kawai, Y.; Nakamura, H.; Kawakami, K.; Ishizaka, A.; Ebisawa, T. Tetsu-to-Hagané. 1983, vol. 69, p. 1755.
- 3) Wei, P.; Sano, M.; Hirasawa, M.; Mori, K. Tetsu-to-Hagané. 1990, vol. 76, p. 878.
- 4) Matsui, A.; Nabeshima, S.; Matsuno, H.; Kikuchi, N.; Kishimoto, Y. Tetsu-to-Hagané. 2009, vol. 95, p. 207.
- 5) 井上道雄, 森一美. 日本鉄鋼協会 溶鉄・溶滓の物性値便覧 (斎藤恒三編). 1971.
- 6) Kai, T.; Okohira, K.; Hirai, M.; Murakami, S.; Sato, N. Tetsu-to-Hagané. 1982, vol. 68, p. 1946.
- 7) Sundberg, Y. Scand. J. Metall. 1978, vol. 7, p. 81.
- 8) Ohguchi, S.; Robertson, D. G. C.; Deo, B.; Grieverson, P.; Jeffes, J. H. E.

Ironmaking and Steelmaking. 1984, vol. 11, p. 202.

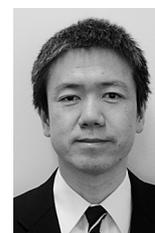
- 9) Kitamura, S.; Kitamura, T.; Shibata, K.; Mizukami, Y.; Mukawa, S.; Nakagawa, J. ISIJ Int. 1991, vol. 31, p. 1322.
- 10) Steelmaking Data Sourcebook Revised Edition, The 19th Committee (Steelmaking). The Japan Society for the Promotion of Science (JSPS), Tokyo, 1984.
- 11) Turkdogan, E. T. ISIJ Int. 2000, vol. 40, p. 964.
- 12) Ban-ya, S. ISIJ Int. 1993, vol. 33, p. 2.
- 13) Ogasawara, Y.; Kikuchi, N.; Matsui, A.; Kishimoto, Y. Iron & Steel Technology. 2012, vol. 9, No. 1, p. 220.
- 14) Ogasawara, Y.; Miki, Y.; Uchida, Y.; Kikuchi, N. ISIJ Int. 2013, vol. 53, p. 1786.
- 15) Tomiyama, S.; Uchida, Y.; Mizuno, H.; Akiu, K.; Maeda, T. A novel control algorithm for dephosphorization in an LD converter. Journal of Process Control. 2015, vol. 25, p. 35.
- 16) Aapo, Hyvärinen.; Juha, Karhunen.; Erkki, Oja. 【詳解】独立成分分析 信号解析の新しい世界. 根元幾, 川勝真喜訳. 東京電気大学出版局. 2005.



菊池 直樹



松井 章敏



富山 伸司